

基于 *TVDI* 的攀西地区干旱 时空变化特征研究

邓锦山¹, 李卓蔓¹, 陈尚书², 陈玥¹, 李良冬²

(1.四川省水利科学研究院,四川成都610072;2.四川省水安全与水旱灾害防御中心,四川成都610041)

摘要:利用 MODIS 地表温度数据 (*LST*) 和归一化植被指数 (*NDVI*) 构建 Ts-NDVI 特征空间,通过计算温度植被干旱指数 (*TVDI*) 详细分析了攀西地区 2001—2020 年干旱时空变化规律。结果表明:(1)从时间角度来看,20 年间攀西地区 *TVDI* 年均值介于 0.5481~0.5820,以 $-0.0001 \cdot a^{-1}$ 速率缓慢减小,且在 2001 年和 2009 年出现大范围中旱。季节性干旱特点表现为冬干春旱,各季 *TVDI* 均值分别为冬季 0.5618、春季 0.6058、夏季 0.5590、秋季 0.5365,表明冬、春两季较夏、秋两季更容易形成干旱。*TVDI* 月均最大值出现在 5 月份,为 0.6089;最小值出现在 9 月份,为 0.5204;每年 2—6 月以中旱为主;7 月起旱情减轻,转为轻旱;10 月起旱情逐渐加重。(2)从空间角度来看,攀西地区旱情变化趋势南北差异明显,南部干旱发生的频率和范围大于北部地区,呈现出中部、南部及西南部高,北部、西北部及东北部低的空间分布特征。(3)从典型干旱年份来看,攀西地区 2001 年、2006 年和 2011 年春旱耕地在空间分布上具有一定的相似性。其中,受中旱的耕地主要分布在攀西北部和中部;而受重旱的耕地主要集中分布在攀西西南部。研究结果表明,2001—2020 年攀西地区旱情稍有缓解,不同季节间干旱差异性较大,干旱范围以攀西中部和南部为主。

关键词:干旱;遥感监测;温度植被干旱指数 (*TVDI*);时空变化;攀西地区

中图分类号:S127;S423 **文献标志码:**A

Temporal and spatial variation characteristics of drought in Panxi region based on *TVDI*

DENG Jinshan¹, LI Zhuoman¹, CHEN Shangshu², CHEN Yue¹, LI Liangdong²

(1. Hydraulic Science Research Institute of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610072, China;

2. Water Security and Flood and Drought Disaster Prevention Center of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Land surface temperature data (*LST*) and normalized vegetation index (*NDVI*) of MODIS were used to construct Ts-NDVI feature space, and the temporal and spatial variation of drought in Panxi region from 2001 to 2020 were analyzed by calculating the temperature vegetation drought index (*TVDI*). The results showed that:(1) From the perspective of time, the annual mean *TVDI* in Panxi area varied between 0.5481 and 0.5820 in 2001–2020, and decreased slowly at a rate of $-0.0001 \cdot a^{-1}$, and there was a large-scale medium drought in 2001 and 2009. The seasonal drought was characterized by dry winter and dry spring. The average *TVDI* of each season was 0.5618 in winter, 0.6058 in spring, 0.5590 in summer and 0.5365 in autumn, indicating that drought was more likely to occur in winter and spring than in summer and autumn. The monthly average value of *TVDI* was 0.6089 in May, the lowest value was 0.5204 in September. From February to June each year, the drought was mainly moderate. The drought eased in July and turned to light drought. In October, the drought gradually increased from light drought. (2) From the perspective of space, there was a significant difference between the north and the south in the variation trend of drought in Panxi. The frequency and scope of drought in the south were higher than

收稿日期:2023-04-23

修回日期:2023-10-07

基金项目:四川省水安全与水旱灾害防御中心重点科技专项(SCWZDL-202205-HQJC01);四川省科技厅基本科研业务费项目(2022-SKY-ZXKY-7)

作者简介:邓锦山(1994-),男,四川成都人,硕士,工程师,主要从事资源与环境遥感、生态遥感、智慧水利等研究。E-mail:823718383@qq.com

通信作者:李卓蔓(1997-),女,云南玉溪人,硕士,工程师,主要从事水文水资源、智慧水利等研究。E-mail:zhuomanlzm@163.com

those in the north, showing a spatial distribution characteristic of higher in the middle, south, southwest, and lower in the north, northwest, northeast. (3) From the perspective of typical drought years, the spatial distribution of spring dry farmland in Panxi in 2001, 2006 and 2011 had certain similarities. Among them, the cultivated land affected by moderate drought was mainly distributed in the north and middle of Panxi. The cultivated land affected by severe drought was mainly distributed in the southwest of Panxi. The results showed that the drought situation in Panxi eased slightly from 2001 to 2020, and the drought varied greatly among different seasons, and the drought scope was mainly in the central and southern Panxi.

Keywords: drought; remote sensing monitoring; TVDI; temporal and spatial variation; Panxi region

干旱是常见的自然灾害^[1],当区域水平衡被打破造成异常水分短缺时易形成干旱,其具有涉及范围广、发生频率高、持续时间长等特点^[2]。特别是在全球气候变暖及高强度人类活动的双重影响下,频繁发生和长期持续的干旱导致生态系统服务功能严重受损,直接或间接产生水资源短缺、土地退化、荒漠化、农作物减产等一系列生态环境和经济问题^[3-4],严重制约着社会的可持续发展。在全球气候变化的背景下,如何迅速、高效、大范围地监测和预测干旱发生和发展规律,并基于区域干旱特点采取科学的应对措施,已成为重要的研究课题。

遥感技术可以宏观、实时、连续、高效地进行地表空间信息采集,现已成为旱灾监测研究的有效手段^[5]。20世纪80年代,运用遥感技术监测干旱的方法得到了快速发展,主要包括以地表温度(Land surface temperature, LST)为基础的热红外遥感监测、以植被指数(Vegetation index, VI)为基础的光学遥感监测、光学与热红外综合遥感监测等多种遥感监测方法^[6-7]。热红外遥感和光学遥感各有优劣,前者受外界影响较小,数据相对稳定可靠,但数据准确性欠佳;后者能快速获取数据信息,时效性好,但数据采集过程容易受到大气辐射的影响。因此,有专家学者综合了二者优势,提出了热红外遥感和光学遥感相结合的干旱监测方法,其中,温度植被干旱指数(Temperature vegetation dryness index, TVDI)具有计算简单、适应性高等优点^[8]。国内外学者通过 TVDI 进行干旱研究取得了一些成果,比如:姜蓝齐等^[4]结合黑龙江实地观测数据对 TVDI 指数进行定量研究,验证了旱地作物不同生育阶段 TVDI 与土壤湿度均呈负相关关系,表明 TVDI 具备反映研究区土壤湿润条件的能力;高培霞等^[9]采用 TVDI 对土壤含水率进行了回归分析与验证,结果表明遥感影像反演所得的 TVDI 与野外实测土壤湿度显著相关, TVDI 反演区域土壤含水量切实可行;魏瑞琪^[10]利用气象站点获取的逐月土壤墒情数据验证了 TVDI 的精度,证明 TVDI 对攀西地区干旱状况监

测可行,并分析了攀西地区 2008—2012 年干旱空间分布特征;文博^[8]通过 MODIS 数据产品和温度植被干旱指数模型对四川省发生的两次特大干旱(2006 年夏季伏旱和 2009—2010 年冬季干旱)进行评估分析,发现 2009—2010 年的旱情集中于攀西地区,最严重时该地区有高达 70% 的区域受到干旱影响。综上所述,利用地表温度和植被指数特征空间耦合而成的温度植被干旱指数(TVDI)监测旱情方法优越、可行性高,可以有效地反映干旱特征。

四川省攀西地区地处大裂谷金沙江干热河谷区,特殊的地理位置和异常的大气环流导致该地区连续多年降水偏少,初夏高温酷热,秋后持续干旱。频繁而重大的干旱灾害不仅给攀西地区农民生活、农业生产造成巨大影响,还会带来经济下滑、环境破坏、生态失衡等社会和经济风险^[11]。目前借助温度植被干旱指数 TVDI 探索不同区域干旱时空变化特征的研究较多,但是针对攀西地区的研究较少,且时间序列较短,本文基于 MOD11A2 和 MOD13A1 遥感数据分别获取 LST 和 NDVI,通过构建 LST-NDVI 特征空间计算 TVDI,并基于 TVDI 指数对攀西地区 2001—2020 年长时间序列的干旱时空变化特征进行分析,同时研究了典型干旱年(2001 年、2006 年和 2011 年)的耕地干旱情况,以为攀西地区科学防旱抗旱提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

攀西地区位于四川省西南部,总面积约为 6.36 万 km²,行政区包括攀枝花市和凉山彝族自治州,共计 20 个市、县,研究区范围如图 1 所示。攀西地区地貌复杂多样,地势西北高、东南低。西北地区位于横断山脉、青藏高原的边缘地带;西部和东北部地区位于攀西大裂谷和凉山褶皱带处;南部和中部地区位于河谷地带。攀西位于亚热带季风气候区,年降水量为 700~1 400 mm,因其地形地貌复杂多样,具有明显的立体气候特征^[12]。夏季受南支西风

急流及东南、西南季风的影响,降水集中,雨量充沛;冬季受大陆气团控制,日照充足,降水量不足全年的 10%。攀西光照充足,热量丰富,日温差较大,年平均日温差 8~14℃,河谷地带可达 10~18℃,形成著名的金沙江干热河谷气候。攀西地区水系众多,河网密集,均属于长江水系,境内主要发育三大水系(金沙江水系、雅砻江水系和安宁河水系)。

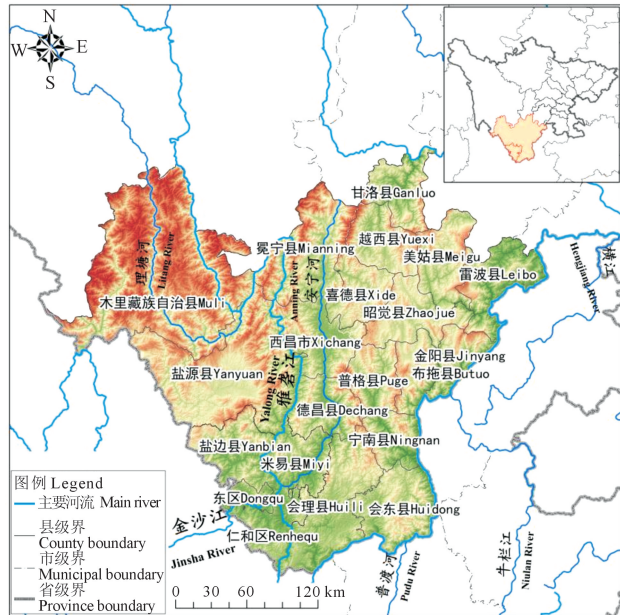


图 1 研究区范围

Fig.1 Study area

1.2 数据来源与处理

(1) 遥感数据:采用 MODIS 遥感数据中的标准产品,分别是 MOD11A2(地表温度)和 MOD13A1(植被指数),下载数据的行列号分别为 h26v05、h26v06、h27v06、h27v05。其中,MOD11A2 为 8 d 合成产品数据,空间分辨率为 1 km,数据日期为 2001—2020 年,共 20 a,每年 46 期,即 1 840 景影像数据;MOD13A1 为 16 d 合成产品数据,空间分辨率为 500 m,数据日期为 2001—2020 年,共 20 a,每年 23 期,即 920 景影像数据。利用 MRT 和 ENVI 软件对 MODIS 影像进行投影、校正、图幅拼接、镶嵌裁剪等操作。在 ENVI 软件中使用均值合成法将 8 d 的 LST 数据合成月值 LST 数据,采用最大值合成法将 16 d 的 $NDVI$ 数据合成月值 $NDVI$ 数据。通过 ArcGIS 进行重采样后,分辨率为 1 km,实现地表温度产品与植被指数产品空间分辨率一致。

(2) 高程数据:从地理空间数据云官网(<http://www.gscloud.cn>)下载数字高程模型(Digital elevation model, DEM),采用 ASTGTM-DEM 产品,空间分辨

率为 30 m,为匹配遥感影像的空间分辨率,将其重采样为 1 km,用于对 LST 数据进行地形校正。

(3) 土地利用数据:土地利用数据(LUCC)取自 GlobeLand30(<http://www.globallandcover.com/>),空间分辨率为 30 m,共分为 10 种类型。结合研究目标及攀西地区实际情况,将其重分类为 6 个一级地类,分别是耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地。

1.3 研究方法

Price^[13]、Carlson^[14]、Susan^[15]、Sandholt^[16] 等学者通过对 $NDVI$ 和 LST 进行耦合研究时,发现 $NDVI$ 和 LST 耦合所形成的特征空间呈现明显的梯形或三角形,表现为明显的负相关。植被指数所代表植被覆盖度的降低,会加快地表水分蒸发,造成地表温度升高^[17]。在此基础上,Sandholt 等^[16] 提出温度植被干旱指数 $TVDI$,利用 T_s-NDVI 特征空间提取的水分胁迫指标来估算陆面表层土壤水分, $TVDI$ 估算公式如下:

$$TVDI = \frac{LST_i - LST_{imin}}{LST_{imax} - LST_{imin}} \quad (1)$$

$$LST_{imax} = a + b \times NDVI_i \quad (2)$$

$$LST_{imin} = c + d \times NDVI_i \quad (3)$$

式中, $NDVI_i$ 为像元对应的归一化植被指数; LST_i 为地表温度; LST_{imin} 和 LST_{imax} 分别为像元 $NDVI$ 在特征空间中所对应的最低及最高地表温度,即干边和湿边; a 、 b 是湿边拟合方程的系数, c 、 d 为干边拟合方程系数,都为待定系数通过特征空间线性拟合计算得出。

$TVDI$ 的值域范围为 0~1,参考众多温度植被干旱指数的研究成果^[18-19],基于研究区实际情况和现有研究对旱情等级的划分方法,将攀西地区旱情分为 5 个等级,如表 1 所示。

2 结果与分析

2.1 攀西地区干旱时间分布特征

从不同时间尺度下,分析 2001—2020 年攀西地区 $TVDI$ 时间序列变化特征。从年际变化可知(图 2),2001—2020 年间攀西地区 $TVDI$ 年均值变化介于 0.5481~0.5820,对比干旱等级划分表,旱情处于轻旱和中旱之间,即表现为近地表空气偏干,土壤表面干燥,植被叶片缺水干黄。其中,2008 年干旱程度最小,其 $TVDI$ 值为 0.5481;2001 年和 2009 年干旱程度最大,其 $TVDI$ 值均为 0.5820。此外,年均值表现为中旱的年份有 2001 年、2003 年、2009 年、2010 年、2012 年和 2014 年。通过对年均 $TVDI$ 线性

拟合,发现倾向率以 $-0.0001 \cdot a^{-1}$ 速率较缓慢下降,且通过了 0.05 显著性水平检验,表明近 20 年攀西地区旱情整体呈缓慢下降趋势。

表 1 温度植被干旱指数 (TVDI) 干旱等级划分标准

Table1 Drought classification criteria of temperature vegetation drought index (TVDI)

TVDI	土壤/植被状况 Soil/vegetation condition	干旱等级 Drought grade
0~0.46	地表湿润 Surface wetting	无旱 Non-drought
0.46~0.57	土壤水分正常或近地表空气偏干 Soil moisture is normal or the air near the surface is dry	轻度干旱 Mild drought
0.57~0.76	土壤表面干燥,植被叶片缺水干黄 The soil surface is dry, and the vegetation leaves are dry and yellow	中度干旱 Moderate drought
0.76~0.86	土壤出现干土层,叶片干黄 Soil appears dry soil layer and leaves are dry and yellow	重度干旱 Severe drought
0.86~1.00	地表植物出现干枯死亡现象 The surface plants dried up and died	极端干旱 Extreme drought

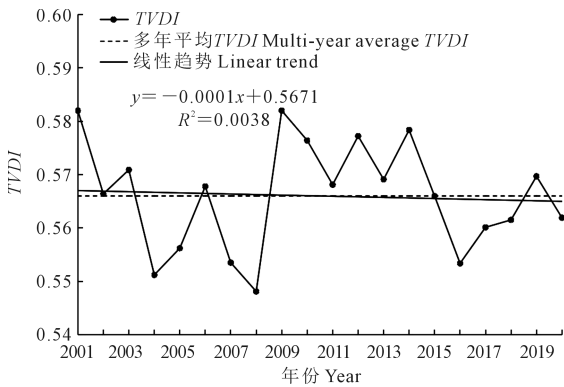


图 2 攀西地区 2001—2020 年 TVDI 年际变化趋势

Fig.2 Variation trend of TVDI in Panxi from 2001 to 2020

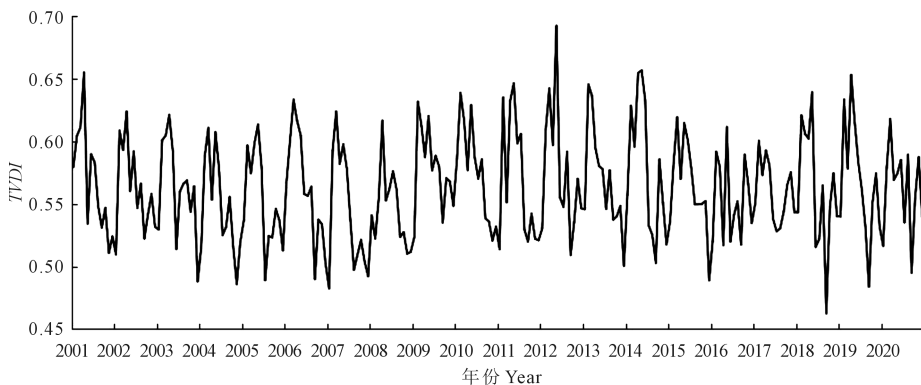


图 4 攀西地区 2001—2020 年的 TVDI 逐月变化

Fig.4 Monthly changes of TVDI in Panxi from 2001 to 2020

为了更直观反映 2001—2020 年攀西地区干旱情况,图 3 统计了每年不同干旱等级面积占比,总体表现为中旱面积最大,为 50.56%;轻旱面积次之,为 39.88%;无旱面积仅为 9.56%。无旱面积占比为 4.12%~20.28%,近 20 年整体呈缓慢增加的趋势,其中 2016 年无旱面积占比最大,为 13 734.4 km²;2009 年无旱面积占比最小,为 2 794.19 km²。轻旱面积占比为 34.44%~46.84%,近 20 年整体呈缓慢增加的趋势,其中 2017 年轻旱面积占比最大,为 31 715.67 km²;2009 年轻旱面积占比最小,为 23 332.54 km²。中旱面积占比为 36.54%~61.43%,近 20 年整体呈缓慢减小的趋势,其中 2009 年中旱面积占比最大,为 41 617.45 km²;2016 年中旱面积占比最小,为 24 739.21 km²。

由 TVDI 的逐月变化(图 4)和 TVDI 的月均值变化(图 5)可以看出,近 20 年攀西地区 TVDI 的月均值介于 0.5204~0.6089。攀西地区每年的 2—6 月基本为中旱;从 7 月开始旱情逐渐减轻,转为轻旱;10 月开始旱情又逐渐加重。近 20 年 TVDI 月均最大值

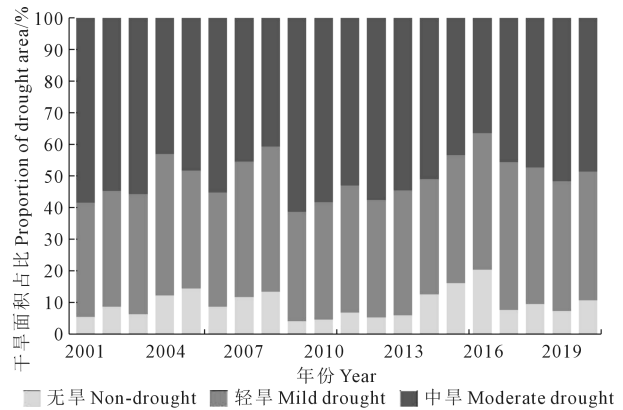


图 3 攀西地区 2001—2020 年各等级干旱面积比例的时间变化

Fig.3 Temporal variation of the proportion of drought area in Panxi from 2001 to 2020

出现在 5 月份,旱情最严重;最小值出现在 9 月份,旱情最轻。2001—2020 年中,出现中旱的月份数最少的为 2008 年,仅有 4 月和 7 月为中旱;出现中旱月份数最多的为 2009 年,2—8 月和 10—11 月均为中旱,持续时间最长;其次为 2010 年,1—8 月均为中旱。

从季节角度来看,*TVDI* 随着季节变化呈现出不同的变化趋势。如图 6 所示,*TVDI* 四季均值分别为冬季(12 月~次年 2 月)0.5618、春季(3—5 月)0.6058、夏季(6—8 月)0.5590 和秋季(9—11 月)0.5365,

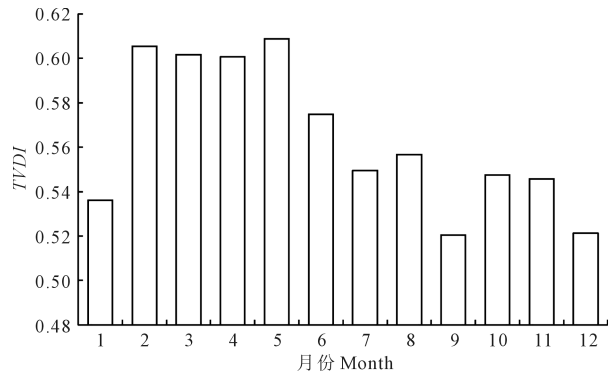


图 5 攀西地区 2001—2020 年的 *TVDI* 月均值变化

Fig.5 Monthly mean changes of *TVDI* in Panxi from 2001 to 2020

线性倾向率分别为 $0.0009 \cdot a^{-1}$ (冬季)、 $0.0004 \cdot a^{-1}$ (春季)、 $-0.0003 \cdot a^{-1}$ (夏季) 和 $0.0006 \cdot a^{-1}$ (秋季),说明近 20 年来攀西地区夏季旱情轻微缓解,而冬季、春季、秋季呈现轻微加重现象。春季 *TVDI* 均值范围为 0.5859~0.6438,春季温度逐渐回升,植物进入返青生长期,所需水分增加,但降雨不足,容易形成干旱,攀西地区春季主要以中旱为主;夏季 *TVDI* 均值范围为 0.5249~0.5809,6 月开始进入夏季,随着温度的上升,冰雪消融,降雨量增多,径流量增加,植被量也逐渐增长,因此夏季相比春季旱情有所缓解;秋季 *TVDI* 均值范围为 0.5067~0.5614,秋季相对夏季雨量减少,初秋气温仍较高,蒸发量大,植被蒸腾作用没有减弱,需水量较大,因此可能造成旱情加重;冬季 *TVDI* 均值范围为 0.5185~0.5925,冬季虽然气温低,蒸腾作用弱,但降雨稀少,无法为植被或者农作物提供足够的水源,因此,冬、春两季相比夏、秋两季更容易形成干旱。

2.2 攀西地区干旱空间分布特征

攀西地区 2001—2020 年 *TVDI* 多年平均空间分布如图 7 所示,攀西地区干旱整体表现为中部、南部、西南部高及北部、西北部、东北部低的空间分布特征。最低值主要集中在攀西北部,如木里藏族自治县、冕宁县、甘洛县、美姑县、雷波县,*TVDI* 基本在 0.57

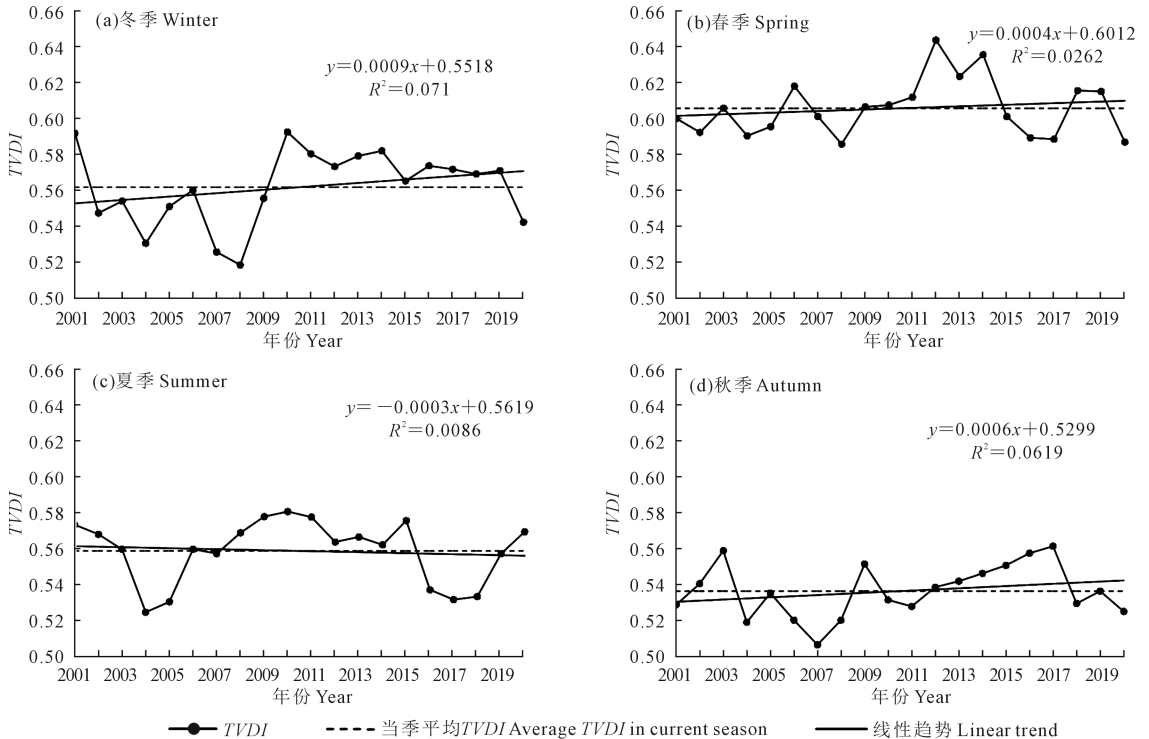


图 6 不同季节下攀西地区 *TVDI* 时间变化趋势

Fig.6 Time variation trend of *TVDI* in Panxi under different seasons

以下,属于无旱和轻旱;攀西中部主要以轻旱和中旱为主,TVDI 介于 0.46~0.76,如盐源县、西昌市北部、喜德县、岳西县、昭觉县、金阳县、布拖县、普格县、德昌县、盐边县、会东县;最高值主要集中在攀西的南部、西南部地区及东部边缘地区,如西昌市中部、攀枝花市、米易县、会理县南部、宁南县中部等,主要以中旱为主。

从不同年份来看,2001 年、2009 年及 2012 年 TVDI 属于中旱的面积明显大于其他年份,中旱面积占比均大于 55%,整个地区的 TVDI 相较于其他年份呈现明显增大趋势,尤其在攀枝花市、盐边县、米易县、会理县、会东县,TVDI 增加明显。干旱程度较小的年份为 2015 年、2016 年,其无旱面积占比分别为 16.12%、20.2%,主要分布在木里藏族自治县和冕宁县,德格县、普格县及宁南县小部分地区亦有分布。

由于受到季节性太阳辐射、气温、降雨、地形、空气湿度以及植被类型等多种因素影响,攀西地区不同季节 TVDI 的空间分布状况差异显著(图 8)。总体上攀西地区南部干旱发生的频率和范围大于北部地区。攀西地区北部(木里藏族自治县、冕宁县、甘洛县、越西县、美姑县、雷波县等)冬、春季干旱主要以轻旱、中旱为主,夏、秋季部分区域干旱情

况有所缓解,主要以无旱和轻旱为主;攀西地区中部(盐源县、西昌市、喜德县、昭觉县、普格县、金阳县、布拖县、德昌县等)冬季和春季以轻旱和中旱为主,夏、秋季干旱情况有所缓解,中旱面积减小,无旱和轻旱面积增多;攀西地区南部(盐边县、米易县、会理县、东区、西区、仁和区、宁南县、会东县)冬季以中旱为主,春季以中旱和重旱为主,夏、秋季干旱情况有所减弱,表现为由中旱过渡为轻旱。

2.3 典型干旱年空间分布特征

通过查阅气象灾害年鉴、抗旱专题报道和论文^[20-23]等资料,发现四川地区 2001 年、2006 年、2011 年均出现较为严重的干旱情况,而通过上述研究发现,攀西地区干旱又主要表现为春旱。因此,为分析攀西地区春旱造成的具体受灾区域,本研究选取上述 3 个年份作为攀西地区典型干旱年,提取 2001 年、2006 年、2011 年耕地数据,对 3 个不同年度的耕地春旱情况进行对比分析。攀西地区 2001 年、2006 年、2011 年耕地春旱空间分布如图 9 所示,3 个典型干旱年的春旱在空间分布上具有一定的相似性。耕地区域绝大部分发生了中旱以上的旱情,其中中旱主要集中在攀西北部及中部安宁河流域,而重旱主要集中在攀西西南部。

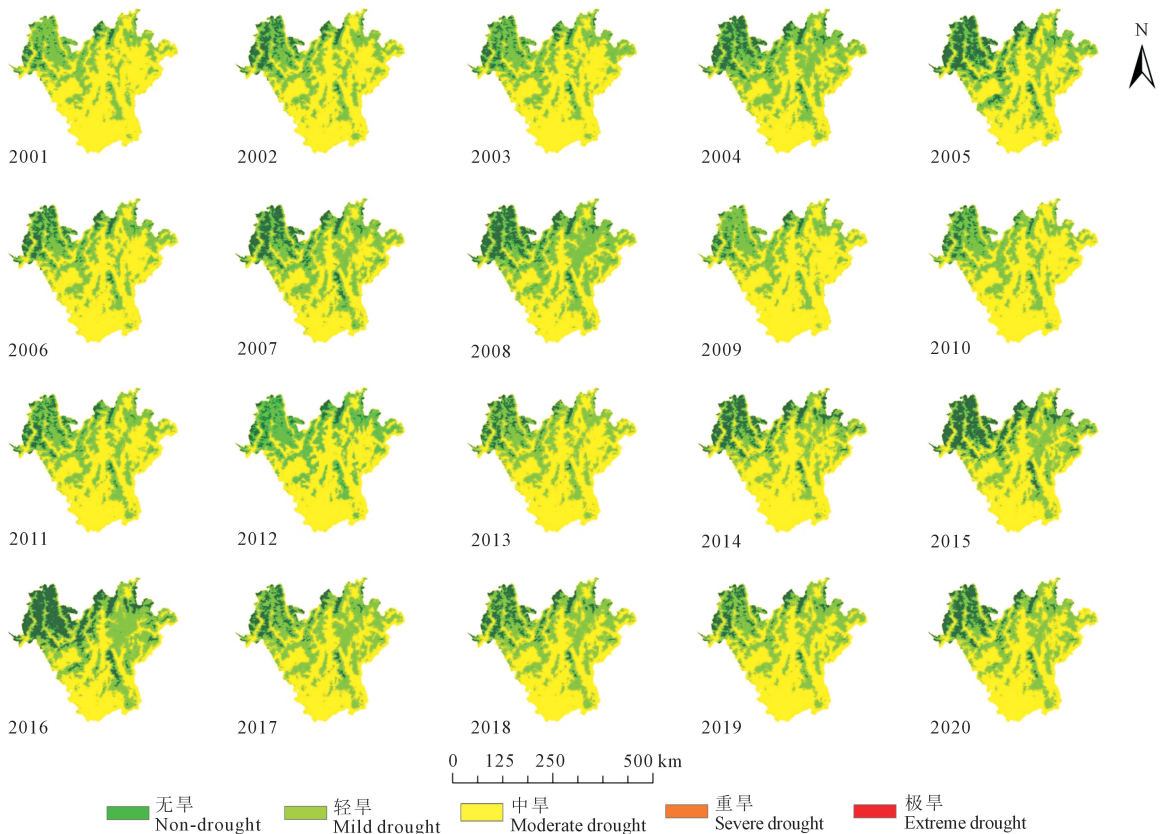


图 7 攀西地区 2001—2020 年 TVDI 空间分布

Fig.7 Spatial distribution of TVDI in Panxi from 2001 to 2020

攀西地区典型干旱年不同行政区春旱耕地面积占比统计情况如表 2。整体来看,攀枝花市下辖仁和区、盐边县、米易县耕地均发生了重旱,平均重旱耕地面积占总耕地面积分别为仁和区 4.59%、盐边县 2.56%、米易县 1.44%;此外,攀枝花市下辖东区和西区、凉山州下辖偏南的会理县、宁南县、盐源县、会东县、木里藏族自治县也出现了小面积的重旱区域;其余各区县没有出现重旱的情况。2001 年、2006 年和 2011 年整体干旱情况最为严重的是攀枝花市下辖仁和区,干旱耕地面积占比分别为 10.77%、11.14% 和 10.87%;其次为冕宁县,干旱耕地面积占比分别为 9.8%、10.03% 和 9.85%;盐边县干旱耕地面积占比分别为 7.99%、8.17% 和 8.06%。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 从时间角度分析,在月际尺度下,2001—2020 年攀西地区 *TVDI* 月均值介于 0.5204~0.6089,每年 2—6 月旱情基本表现为中旱, *TVDI* 月均值高于 0.57;7 月开始旱情逐渐减轻,转为轻旱;10 月旱情又开始逐渐加重。20 年中 *TVDI* 月均值最大出现在 5 月份,旱情最严重;最小值出现在 9 月份,旱情最轻。季节尺度下, *TVDI* 随季节更替呈现出不同的变化特征, *TVDI* 均值分别为冬季 0.5618、春季 0.6058、夏季 0.5590、秋季 0.5365;线性倾向率分别为 $0.0009 \cdot a^{-1}$ (冬季)、 $0.0004 \cdot a^{-1}$ (春季)、 $-0.0003 \cdot a^{-1}$

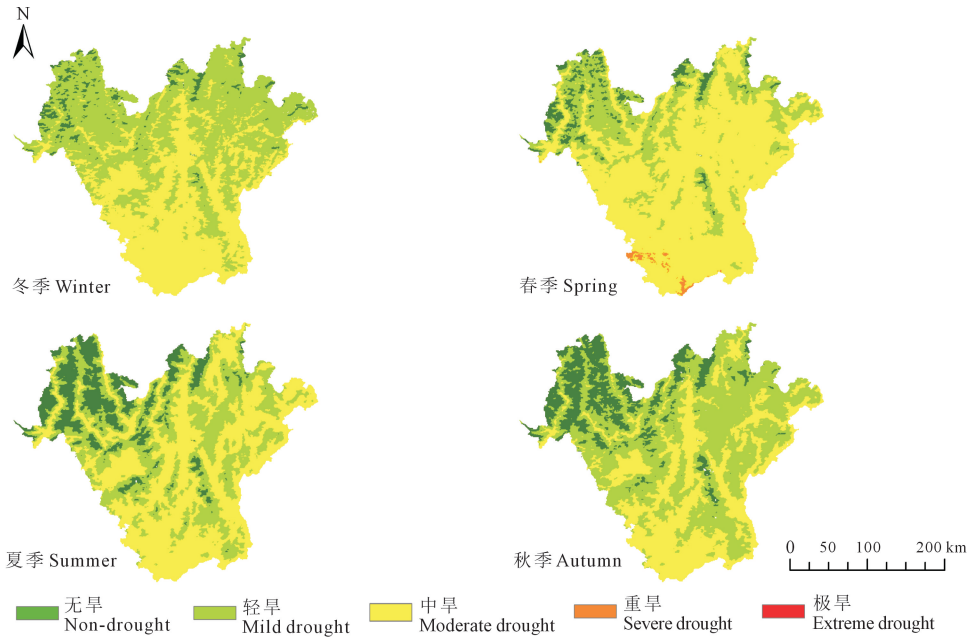


图 8 不同季节下攀西地区 *TVDI* 空间变化趋势

Fig.8 Spatial variation trend of *TVDI* in Panxi under different seasons

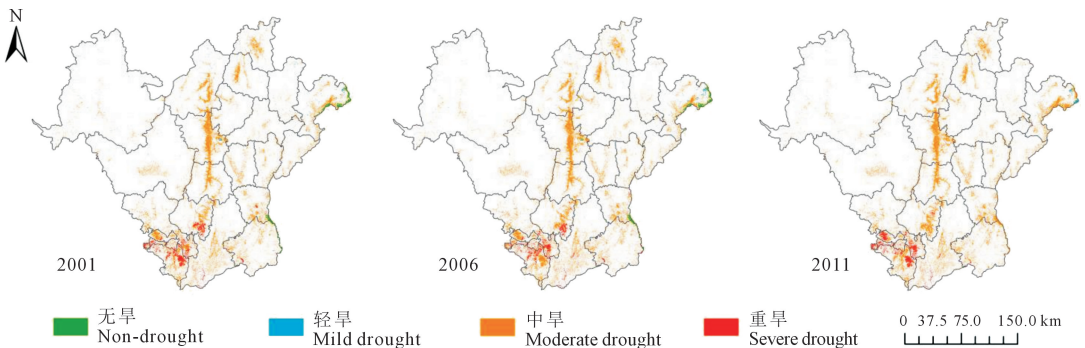


图 9 典型干旱年春旱耕地空间分布

Fig.9 Spatial distribution of dry arable land in spring in typical drought years

表 2 典型干旱年春旱耕地面积占比统计/%

Table 2 Statistics on the proportion of dry arable land in spring in typical drought years

行政区 Region	2001				2006				2011			
	轻旱 MLD	中旱 MOD	重旱 SD	总和 Sum	轻旱 MLD	中旱 MOD	重旱 SD	总和 Sum	轻旱 MLD	中旱 MOD	重旱 SD	总和 Sum
喜德 Xide	0.01	5.53	0.00	5.53	0.00	5.66	0.00	5.66	0.00	5.80	0.00	5.80
盐边 Yanbian	0.00	6.61	1.38	7.99	0.00	5.86	2.31	8.17	0.00	4.06	4.00	8.06
盐源 Yanyuan	0.01	3.14	0.00	3.16	0.01	2.11	0.06	2.17	0.01	2.10	0.02	2.13
越西 Yuexi	0.02	2.97	0.00	2.99	0.01	3.04	0.00	3.06	0.01	2.99	0.00	3.00
昭觉 Zhaojue	0.00	1.81	0.00	1.81	0.00	1.85	0.00	1.85	0.00	2.06	0.00	2.06
布拖 Butuo	0.00	1.67	0.00	1.68	0.00	1.72	0.00	1.72	0.00	1.76	0.00	1.77
德昌 Dechang	0.01	5.49	0.00	5.50	0.01	5.62	0.00	5.63	0.02	5.51	0.00	5.52
东区 Dongqu	0.00	0.44	0.39	0.84	0.00	0.42	0.48	0.90	0.00	0.62	0.27	0.89
甘洛 Ganluo	0.08	3.34	0.00	3.42	0.06	3.44	0.00	3.50	0.04	3.40	0.00	3.44
会东 Huidong	0.01	4.10	0.00	4.12	0.00	4.23	0.15	4.38	0.00	5.66	0.00	5.66
会理 Huili	0.01	4.03	0.01	4.05	0.01	3.89	0.24	4.14	0.02	3.89	0.15	4.06
金阳 Jinyang	0.00	1.32	0.00	1.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39	0.00	1.40
雷波 Leibo	0.53	5.29	0.00	5.82	0.75	5.23	0.00	5.97	0.78	7.54	0.00	8.32
美姑 Meigu	0.10	0.74	0.00	0.85	0.05	0.82	0.00	0.87	0.03	0.82	0.00	0.85
米易 Miyi	0.00	4.71	2.22	6.93	0.00	5.21	1.87	7.09	0.00	6.73	0.23	6.96
冕宁 Mianning	0.11	9.69	0.00	9.80	0.08	9.95	0.00	10.03	0.12	9.73	0.00	9.85
木里 Muli	0.18	1.95	0.00	2.12	0.13	2.04	0.01	2.18	0.17	1.96	0.01	2.13
宁南 Ningnan	0.01	3.76	0.23	3.99	0.00	3.90	0.18	4.09	0.01	4.98	0.01	4.99
普格 Puge	0.00	2.15	0.00	2.16	0.00	2.20	0.00	2.20	0.01	2.16	0.00	2.16
仁和 Renhe	0.06	5.78	4.93	10.77	0.00	7.84	3.30	11.14	0.00	5.31	5.56	10.87
西昌 Xichang	0.14	9.05	0.00	9.19	0.02	9.28	0.00	9.30	0.03	9.30	0.00	9.33
西区 Xiqu	0.00	0.26	0.46	0.72	0.00	0.40	0.33	0.73	0.00	0.12	0.60	0.72
总和 Sum	1.30	83.83	9.62		1.13	84.71	8.93		1.25	87.88	10.84	

注:MLD、MOD 和 SD 分别表示轻旱、中旱和重旱。

Note: MLD, MOD and SD represented mild drought, moderate drought and severe drought, respectively.

(夏季)和 $0.0006 \cdot a^{-1}$ (秋季),表明 2001—2020 年攀西地区夏季旱情稍有缓解,而冬季、春季和秋季旱情轻微加重。年际尺度下,2001—2020 年攀西地区 TVDI 年均值介于 $0.5481 \sim 0.5820$,且 2008 年干旱程度最小,2001 年和 2009 年干旱程度最大;通过对年均 TVDI 线性拟合发现倾向率以 $-0.0001 \cdot a^{-1}$ 速率较缓慢下降,表明近 20 年来攀西地区旱情稍有缓解。

(2)通过统计 2001—2020 年不同干旱等级面积占比发现,无旱面积均值占比为 9.56%,整体呈缓慢增加的趋势;轻旱面积均值占比为 39.88%,整体呈缓慢增加的趋势;中旱面积均值占比最大,为 50.56%,整体呈缓慢减小的趋势。

(3)从空间角度分析,2001—2020 年攀西地区旱情变化趋势南北差异明显,南部干旱发生的频率和范围大于北部地区,具体表现为中部、南部及西南部高,北部、西北部、东北部低的空间分布特征。攀西地区不同季节 TVDI 的空间分布也存在显著差异。北部冬、春季干旱主要以轻旱、中旱为主,夏、秋季部分区域干旱情况有所减弱,主要以无旱和轻旱为主;中部冬季和春季以轻旱和中旱为主,夏、秋季干旱情况有所减弱;南部冬季以中旱为主,春季

以中旱和重旱为主,夏、秋季干旱情况有所减弱。

(4)攀西地区 2001 年、2006 年和 2011 年春旱耕地在空间分布上具有一定的相似性。中旱主要集中在攀西北部和中部分安宁河流域;而重旱主要集中在攀西西南部。整体来看,仁和区、盐边县、米易县耕地均发生了重旱,平均重旱耕地面积占总耕地面积分别为仁和区 4.59%、盐边县 2.56%、米易县 1.44%。干旱情况最为严重的是仁和区,3 个年份干旱耕地面积占比分别为 10.77%、11.14%和 10.87%;其次为冕宁县,干旱耕地面积占比分别为 9.8%、10.03%和 9.85%;盐边县干旱耕地面积占比分别为 7.99%、8.17%和 8.06%。

3.2 讨论

本研究以 MODIS 为数据源,利用 TVDI 指数对攀西地区进行长时序干旱动态监测,研究结果表明采用 TVDI 指数反映攀西地区干旱情况是切实可行的,这与已有相关研究结果一致^[8,10,20-24]。以往研究结果表明攀西地区冬春季节最易发生干旱,主要是降水量时空分布不均,造成土壤含水量比例失调。由上述结果可知,攀西地区春旱发生频次高、范围广,究其原因是春季为植被生长季,对水的需求量大,而降雨少导致植物长势差,因此表现出干

旱。此外,攀西地区干旱情况的变化与气候变化存在一定的联系。攀西具有特殊地理位置和异常的大气环流,属中亚热带和南亚热带季风气候,形成典型的干旱河谷和干热河谷,主要分布在金沙江、安宁河和雅砻江等西南地区流域。因河谷走向与西南暖流方向垂直,金沙江流域段焚风效应明显,形成降雨稀少、蒸发强烈的干热河谷。安宁河、雅砻江流域段与西南季风平行,河谷内气温高、蒸发量大、降水量偏少、水分收支不平衡,形成干旱河谷。在每年 11 月~次年 5 月,西南季风长驱直入,造成干旱少雨、晴朗多风的气候,而在每年 6—10 月雨量相对集中,干旱缓解^[25]。除气候变化外,科学的种植结构、高质量的灌溉方式以及现代化节水技术等人类活动与干旱之间的关系,将是未来干旱课题的重要研究方向。此外,TVDI 指标的干旱等级划分标准不同可能会使得无旱、轻旱、中旱、重旱和极旱的划分结果不一致。如黄静^[26]、屈新星^[27]等对于干旱等级划分均有不同,致使部分干旱结论存在差异。

本研究仅从时间和空间的角度对攀西地区干旱情况进行时空分析,并未结合土地利用类型、高程、降雨、温度、蒸发等因素进一步探讨其与干旱之间的关系。因此,后续将从多角度出发,研究不同因素对干旱的响应程度,这对于攀西地区干旱研究将更具实际意义。

参 考 文 献:

- [1] 韩兰英,张强,姚玉璧,等.近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J].地理学报,2014,69(5):632-639.
HAN L Y, ZHANG Q, YAO Y B, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 632-639.
- [2] 何建村,白云岗,张严俊.基于 MODIS 数据新疆土壤干旱特征分析[J].干旱区地理,2015,38(4):735-742.
HE J C, BAI Y G, ZHANG Y J. Soil drought characteristics in Xinjiang with remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 735-742.
- [3] 程小强,周兆叶,李旺平,等.基于 MODIS 数据的中亚地区旱情监测及影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(10):128-137.
CHENG X Q, ZHOU Z Y, LI W P, et al. Monitoring drought situation and analyzing influencing factors in Central Asia using MODIS data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10): 128-137.
- [4] 姜蓝齐,王萍,姜丽霞,等.温度植被干旱指数(TVDI)在农业干旱监测中的应用[J].中国农学通报,2021,37(29):132-139.
JIANG L Q, WANG P, JIANG L X, et al. Temperature vegetation dryness index and its application in agricultural drought monitoring[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(29): 132-139.
- [5] 韩东,王鹏新,张悦,等.农业干旱卫星遥感监测与预测研究进展[J].智慧农业(中英文),2021,3(2):1-14.
HAN D, WANG P X, ZHANG Y, et al. Progress of agricultural

- drought monitoring and forecasting using satellite remote sensing[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(2): 1-14.
- [6] 杨丽萍,白宇兴,朱江山,等.基于优选植被指数和 TVDI 的额济纳绿洲旱情监测[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(6):727-734.
YANG L P, BAI Y X, ZHU J S, et al. Drought monitoring in Ejina oasis based on optimal vegetation index and TVDI[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(6): 727-734.
- [7] 周磊,武建军,张洁.以遥感为基础的干旱监测方法研究进展[J].地理科学,2015,35(5):630-636.
ZHOU L, WU J J, ZHANG J. Remote sensing-based drought monitoring approach and research progress[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(5): 630-636.
- [8] 文博.四川省干旱时空分布特征研究[D].成都:四川师范大学,2014.
WEN B. Research on temporal and spatial distribution of drought in Sichuan Province[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014.
- [9] 高培霞,张吴平,梁爽,等.基于温度植被干旱指数(TVDI)的土壤干湿反演[J].灌溉排水学报,2018,37(10):123-128.
GAO P X, ZHANG W P, LIANG S, et al. Retrievably calculating soil moisture based on temperature vegetation drought index of vegetative land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 123-128.
- [10] 魏瑞琪.攀西地区干旱脆弱性时空变化评价研究[D].成都:成都理工大学,2018.
WEI R Q. The spatio-temporal evaluation of drought vulnerability changes in the Panxi region[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [11] 陈永琼.攀枝花市干旱调研报告[J].攀枝花科技与信息,2012,(3):27-33,58.
CHEN Y Q. Drought investigation report in Panzhihua city[J]. Panzhihua Sci-tech & Information, 2012, (3): 27-33, 58.
- [12] 张萌.攀西地区云南松生态风景林群落多样性研究[D].成都:成都理工大学,2021.
ZHANG M. Study on community diversity of *Pinus yunnanensis* ecological landscape forest in Panxi area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [13] PRICE J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 18(1): 59-73.
- [14] CARLSON T N, GILLIES R R, PERRY E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [15] SUSAN MORAN M, HYMER D C, QI J G, et al. Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) in semi-arid rangeland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1/3): 69-80.
- [16] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [17] 王嘉杰.基于 TVDI 的河北省干旱监测及其滞后性研究[D].邯郸:河北工程大学,2022.
WANG J J. Drought monitoring based on TVDI and its lag research in Hebei Province[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.